

**П'ЄЗООПТИЧНИЙ ЕФЕКТ ПОГЛИНАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА**

Тернопільський державний медичний університет ім.І.Я. Горбачевського  
 майдан Волі, 1, Тернопіль, Україна, 46001  
 E-mail: rydjakya@tdmu.edu.te.ua

*Розглянуто застосування п'єзооптичного ефекту поглинального середовища для визначення параметрів напружено-деформованого стану. Проведено аналіз дійсної та уявної частини тензора діелектричної проникності. Показано, що зміни дійсної частини тензора діелектричної проникності, а саме показника заломлення  $n$ , фіксуються інтерференційними методами механіки, а зміни уявної частини (натурального показника поглинання  $\alpha$ ) можна вимірювати шляхом аналізу поглинання світла і, таким чином, визначати напружено-деформований стан.*

**Ключові слова:** п'єзооптичний ефект; поглинання світла; поляризоване випромінювання; тензор діелектричної проникності.

**Постановка проблеми**

Рівняння Неймана та Максвелла пов'язують приріст компонентів тензора діелектричної проникності (ТДП) з компонентами напружено-деформованого стану (НДС).

Для компонент ТДП можна записати

$$\sqrt{\chi} = n - i\alpha,$$

де  $\chi$  – компонента ТДП;

$n$  – показник заломлення;

$\alpha$  – натуральний показник поглинання.

Аналіз дійсної частини ТДП:

$$n_{ij} \leftrightarrow \delta_{ij}, \varepsilon_{ij}.$$

Зміни показника заломлення  $n$  фіксуються шляхом вимірювання оптичної різниці ходу  $\delta$  (різниці фаз). Це створює теоретичні передумови створення інтерференційних методів у механіці деформованого твердого тіла.

Аналіз уявної частини ТДП:

$$\alpha_{ij} \leftrightarrow \delta_{ij}, \varepsilon_{ij}.$$

Напружено-деформований стан визначається шляхом вимірювання п'єзооптичного ефекту поглинального середовища.

**Аналіз досліджень і публікацій**

Застосування оптичних методів для визначення параметрів НДС об'єктів досить широко застосовують в інженерній практиці [1; 2; 5].

Особливо розвинуті інтерференційні методи.

Найбільш поширеним є метод фотопружності.

Застосовуються також методи муарових смуг, метод Теокаріса, голографічної інтерферометрії.

Кожний із вказаних методів, що має свої сфери застосування, дозволяє визначати лінійні комбінації головних компонентів НДС.

Автори праць [3; 4] запропонували нові підходи до застосування зондувального випромінювання для визначення НДС.

Актуальним залишається питання теоретичного обґрунтування п'єзооптичного ефекту поглинального середовища.

**Мета роботи** – теоретично обґрунтувати метод визначення параметрів НДС, який використовує п'єзооптичний ефект поглинального середовища.

**Метод визначення параметрів напружено-деформованого стану**

Аналіз зміни дійсної частини ТДП – показника заломлення  $n$  під дією прикладеного навантаження дозволяє використовувати та розвивати один з найбільш ефективних інтерференційних методів – поляризаційно-оптичний або фотопружність.

Напружено-деформований стан у точці тіла визначається за інтерференційною картиною, яка виникає на виході з аналізатора за рахунок різної швидкості проходження через об'єкт складових поляризованого променя вздовж головних осей ТДП. При цьому виникає оптична різниця ходу  $\delta$ , яка відповідає різниці квазіголовних напружень  $\sigma'_1, \sigma'_2$  та деформацій  $\varepsilon'_1, \varepsilon'_2$  у даній точці.

Основний закон фотопружності – закон Вертейма – пов'язує ці величини формулою

$$\frac{\delta}{Cd} = \sigma'_1 - \sigma'_2,$$

де  $\delta$  – оптична різниця ходу променів;

$C$  – оптико-механічна константа матеріалу, яка називається коефіцієнтом оптичної чутливості;

$d$  – товщина пластинки (зрізу).

Аналіз зміни уявної частини ТДП – натурального показника поглинання  $\alpha$  під дією прикладеного навантаження дозволяє розробити теоретичне обґрунтування методу, який базується на п'єзооптичному ефекті поглинального середовища.

Рівняння Неймана лінійно зв'язують головні значення ТДП з головними деформаціями:

$$\begin{aligned}\chi_1 &= \chi_0 + \psi_1 \varepsilon_1 + \psi_2 (\varepsilon_2 + \varepsilon_3); \\ \chi_2 &= \chi_0 + \psi_1 \varepsilon_2 + \psi_2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_3); \\ \chi_3 &= \chi_0 + \psi_1 \varepsilon_3 + \psi_2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2);\end{aligned}\quad (1)$$

де  $\chi_1, \chi_2, \chi_3$  – головні значення ТДП у точці напруженого тіла;

$\chi_0$  – діелектрична проникність у ненапруженому стані;

$\psi_1, \psi_2$  – оптичні сталі;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – головні деформації в точці напруженого тіла.

Перетворюючи перше з рівнянь системи (1) для двох інших все буде аналогічно, і, опускаючи ряд проміжних викладок, дістаємо:

$$\begin{aligned}\sqrt{\chi_1} - \sqrt{\chi_0} &= (n_1 - n_0) - i(\alpha_1 - \alpha_0) \approx \\ &\approx \frac{(\psi_1 - \psi_2)}{2(n_0^2 - \alpha_0^2)} (n_0 + i\alpha_0) \varepsilon_1 + \frac{\psi_2}{2(n_0^2 + \alpha_0^2)} \times \\ &\times (n_0 + i\alpha_0) (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3).\end{aligned}\quad (2)$$

Рівняння (2) перетворюється до вигляду

$$\begin{aligned}(n_1 - n_0) - i(\alpha_1 - \alpha_0) &= K_1 \varepsilon_1 + K_2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) - \\ &- i[\tilde{K}_1 \varepsilon_1 + \tilde{K}_2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)],\end{aligned}\quad (3)$$

де  $K_1, K_2, \tilde{K}_1, \tilde{K}_2$  – сталі, які визначаються величинами  $\psi_1, \psi_2, n_0, \alpha_0$ .

З рівності (3) випливає рівність дійсної та уявної частин.

Для уявної частини запишемо:

$$\alpha_1 - \alpha_0 = \tilde{K}_1 \varepsilon_1 + \tilde{K}_2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3).\quad (4)$$

Закон Бугера–Ламберта–Бера описує проходження світла через поглинальне середовище рівнянням

$$I = \bar{I} \exp(-4\pi\alpha/\lambda)d,$$

розв'язуючи яке щодо  $\alpha$ , отримуємо

$$\alpha = -\frac{\lambda \ln \frac{I}{\bar{I}}}{4\pi d},\quad (5)$$

де  $\alpha$  – натуральний показник поглинання;

$\lambda$  – довжина хвилі зондувального випромінювання;

$\bar{I}, I$  – інтенсивність світла на вході в середовище і виході з нього відповідно;

$d$  – довжина ходу променів у поглинальному середовищі.

У результаті спільного рішення рівнянь (4) та (5) отримуємо рівняння для визначення головних деформацій для визначення головної деформації  $\varepsilon_1$ :

$$\varepsilon_1 = \frac{\lambda}{4\pi d} \left[ l_1 \left( \ln \frac{I_0}{I_1} \right) + l_2 \left( \ln \frac{I_0}{I_2} \right) + l_3 \left( \ln \frac{I_0}{I_3} \right) \right],$$

де  $I_0$  – інтенсивність світла на виході для ненавантаженого об'єкта;

$I_1, I_2, I_3$  – інтенсивності світла на виході напруженого об'єкта, поляризація вздовж головних напрямків 1, 2, 3;

$l_1, l_2, l_3$  – коефіцієнти, які визначаються за допомогою тарувальних експериментів.

Аналогічний вигляд мають вирази для визначення головних деформацій  $\varepsilon_2, \varepsilon_3$ .

## Висновки

1. Проаналізовано зміни дійсної та уявної частин ТДП під дією навантаження.

2. Показано, що аналіз зміни дійсної частини ТДП (показника заломлення  $n$ ) є передумовою для розвитку інтерференційних методів механіки і одного з найбільш ефективних – поляризаційно-оптичного.

3. Показано, що аналіз зміни уявної частини ТДП (натурального показника поглинання  $\alpha$ ) є передумовою для розвитку методу, який ґрунтується на п'єзооптичному ефекті поглинального середовища.

4. Теоретично обґрунтовано метод визначення параметрів НДС, який використовує п'єзооптичний ефект поглинального середовища.

## Література

1. Александров А.Я. Поляризационно-оптические методы механики деформированного тела / А.Я. Александров, М.Х. Ахметзянов. – Москва: Наука, 1973. – 576 с.
2. Грилицький Д.В. Механічні і оптичні методи дослідження напружено-деформованого стану тіл / Д.В. Грилицький, Ю.І. Сорокатиї. – Львів: ЛДУ, 1984. – 59 с.
3. Кепич Т.Ю. Оптичний метод визначення напружено-деформованого стану об'єктів шляхом аналізу поглинання світла / Т.Ю. Кепич, О.В. Мильніков, Ю.А. Рудяк. – К.: Вісник КНУ, Серія Фіз.-мат. науки. – 2003. – Вип. 5. – С. 45–53.
4. Пат. АС СССР, М.5 кл. G01 В 11/18. Способ определения напряженно-деформированного состояния объекта / А.В. Мильников, Ю.А. Рудяк. – № 1578460 от 15.03.90.
5. Фриштер Л.Ю. Расчетно-экспериментальный метод исследования НДС составных конструкций в зонах концентрации напряжений: автореф. дис. на соиск. науч. степени д-ра физ.-мат. наук / Л.Ю. Фриштер. – Москва, 2009. – 40 с.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2013.

**Рудяк Юрій Аронович.** Кандидат фізико-математичних наук.  
Завідувач кафедри медичної фізики та медичного обладнання.  
Тернопільський державний медичний університет ім. І.Я. Горбачевського, Тернопіль, Україна.  
Напрямок наукової діяльності: оптичні методи експериментальної механіки.  
Кількість публікацій: 50, патентів 5.  
E-mail: rydjakya@tdmu.edu.te.ua

**Yu. Rudyak. Piezooptic effect of absorbing environment**

I.Ya. Horbachevsky Ternopil State Medical University, Freedom Square, 1, Ternopil, Ukraine, 46001  
E-mail: rydjakya@tdmu.edu.te.ua

Application of piezooptic effect of absorbing environment for the definition of the parameter of stress deformation state was examined. The analysis of dielectric permeability tensor of imaginary parts was done. It is shown that changes in the real part dielectric permeability tensor mainly the indicator of fracture was fixed by means of mechanics interference methods and the changes in the imaginary part ( $\alpha$  – real rate of absorption) can be measured by means of analysis of light absorption and thus stress deformation state can be determined.

**Keywords:** polarized emission; rate of light absorption; tensors of dielectric permeability.

**Ю.А. Рудяк. Пьезооптический эффект поглощающей среды**

Тернопольский государственный медицинский университет имени И.Я. Горбачевского, майдан Воли, 1, Тернополь, Украина, 46001  
E-mail: rydjakya@tdmu.edu.te.ua

Рассмотрено применение пьезооптического эффекта поглощающей среды для определения параметров напряженного деформированного состояния. Выполнен анализ действительной и мнимой части тензора диэлектрической проницаемости. Показано, что изменения действительной части тензора диэлектрической проницаемости, а именно, показателя преломления  $n$  фиксируется интерференционными методами механики, а изменения мнимой части ( $\alpha$  – натурального показателя поглощения) можно измерять путем анализа поглощения света и, таким образом, определять напряженное деформированное состояние.

**Ключевые слова:** поглощение света; поляризованное излучение; пьезооптический эффект; тензор диэлектрической проницаемости.

**Рудяк Юрий Аронович.** Кандидат физико-математических наук.  
Заведующий кафедрой физики и медицинского оборудования.  
Тернопольский государственный медицинский университет им. И.Я. Горбачевского, Тернополь, Украина.  
Направление научной деятельности: оптические методы экспериментальной механики.  
Количество публикаций: 50, патентов 5.  
E-mail: rydjakya@tdmu.edu.te.ua